

フェーズドアレイ非対称 TOFD 法探傷条件の 超音波伝搬シミュレーション解析による検討

Evaluation of a phased array asymmetrical TOFD ultrasonic testing method
by ultrasonic propagation simulation

石田 仁志 (Hitoshi Ishida) *1

要約 原子力発電所の維持規格により、供用期間中検査において欠陥が検出された場合には、その設備の健全性評価が求められる。そのためには、欠陥の寸法を精度よく測定することが必要となる。2008 年の大飯 3 号機原子炉容器の出口管台異材継手部の内面で見つかった応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) は、内面側からの探傷に使用されていた従来の超音波探傷法では深さ測定が困難であった。そのために、筆者らは、フェーズドアレイ法を用いた非対称超音波ビームによる TOFD (Time of Flight Diffraction) 超音波探傷法を開発し、測定試験によりその有効性を検証している。さらに、本手法による超音波伝播をシミュレーション解析し、欠陥端部における端部回折波の発生と検出について検討し、本手法の有効性を確かめた。

キーワード 超音波探傷試験, フェーズドアレイ法, TOFD 法, シミュレーション解析, 端部エコー

Abstract Fitness rules for nuclear power plants require that component integrity assessments be performed if defects are detected during in-service inspections. Such assessments require accurate measurement of defect dimensions.

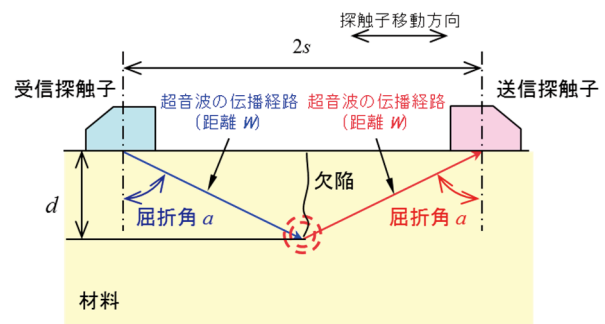
In 2008, stress corrosion cracking (SCC) was found on the inner surface of the outlet nozzle dissimilar weld of the Ohi-3 reactor vessel, but at that time it was difficult to measure the depth of the SCC using conventional ultrasonic testing methods that were used to detect cracks from the inner surface. A few years later, to overcome this problem, we developed a time-of-flight diffraction (TOFD) ultrasonic testing method using an asymmetric ultrasonic beam with a phased array method and verified its effectiveness through measurement tests. Furthermore, we performed a simulation to evaluate the ultrasonic wave propagated by the TOFD ultrasonic testing method, investigated the generation and detection of diffraction waves at the tip of the defect, and confirmed the effectiveness of the testing method.

Keywords Ultrasonic testing, Phased array method, Time of flight diffraction method, Ultrasonic waves propagation simulation analysis, Tip echo

1. はじめに

2008 年に大飯 3 号機原子炉容器出口管台異材継手部で発見された内面の割れに対して、内面すなわち割れの開口面側からの測定がなされ、切削調査の結果、軸方向に割れ面を持ち、長さ 13mm、深さ 21mm の、尖鋭な先端の応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) であることが分かった⁽¹⁾。このような尖鋭な先端を持つ SCC の開口面側からの深さ測定が課題であると考え、これに対する超音波探傷法の開発に取り組んだ。

TOFD (Time of Flight Diffraction) 法⁽²⁾は、図 1 に示すように、送信と受信の 2 個の超音波探触子を一定間隔で向い合せて配置し、欠陥の先端で散乱する超音波の伝搬時間を計測することによって、欠陥の深さを精度良く算出する



$$d = \sqrt{W^2 - s^2}$$

$$= \sqrt{\frac{C^2 T_d^2}{4} + C T_d S}$$

C : 超音波伝播速度
 s : 送信と受信の探触子の入射点間距離/2
 T_d : 材料表面(2s)と欠陥端部伝播経路(2W)の超音波伝播時間差

図 1 TOFD 法

*1 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

ことができる。受信探触子がとらえる受信波は、送信探触子から発せられ、欠陥の先端で散乱したものであり、これを受信することができれば、深さ測定が可能である。しかし、送信と受信の探触子を別々に配置することから、溶接部を探傷する場合には、超音波の伝搬経路のうちいずれかは必ず溶接部を通過することとなる。ステンレス鋼や Ni 基合金などの溶接部では超音波の散乱減衰や屈曲により、このような溶接部への適用は困難とされていた。

超音波の減衰が大きい溶接部の探傷に対して、欠陥先端の散乱波の強度向上のために、超音波エネルギーを集めることができるフェーズドアレイ法の適用が考えられた。そこで、TOFD 法にフェーズドアレイ探触子を使用することを考え、さらに、送信と受信の屈折角が異なり、超音波ビームが非対称となるような探傷法を新たに考案した。Ni 基合金溶接部試験体により SCC の開口面側から深さ測定手法として検討を行い、その有効性を確認した⁽³⁻⁶⁾。この手法を、その特徴からフェーズドアレイ非対称 TOFD 法と名付けた。

本報では、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法による欠陥開口面からの探傷において、フェーズドアレイ探触子の振動子数、屈折角の影響を明らかにするために、超音波伝搬シミュレーション解析によりこれを検討した。

2. 探傷方法

2.1 原理

図 2 に示すように、まず超音波の集束とその位置の制御が可能なフェーズドアレイ探触子を TOFD 法に使用することを考えた。送信用のフェーズドアレイ探触子により超音波を焦点位置に集束させ、集束点に欠陥の先端があればその散乱波を受信用のフェーズドアレイ探触子で受信させる。複数の異なる焦点位置の設定により、材料中の欠陥の先端位置を探查することが可能である。

SCC など欠陥の先端形状と屈折角によっては、散乱波の発生と捕捉に影響し、異なる屈折角条件による探傷が有効な場合もあると考えられた。しかし、送受信のフェーズドアレイ探触子の間隔が一定で、送信と受信の屈折角が同じである限りは、ある深さ位置に対する屈折角は 1 条件のみである。そこで、欠陥先端に対して複数の異なる屈折角による探傷結果を得るために、送信と受信の屈折角が同じではない、非対称にすることを考えた。それが、図 3 に示すような、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法 (以下、非対称 TOFD 法) である。送信と受信とで異なる屈折角で探傷することによって、任意の位置に焦点 (交点) を設定する

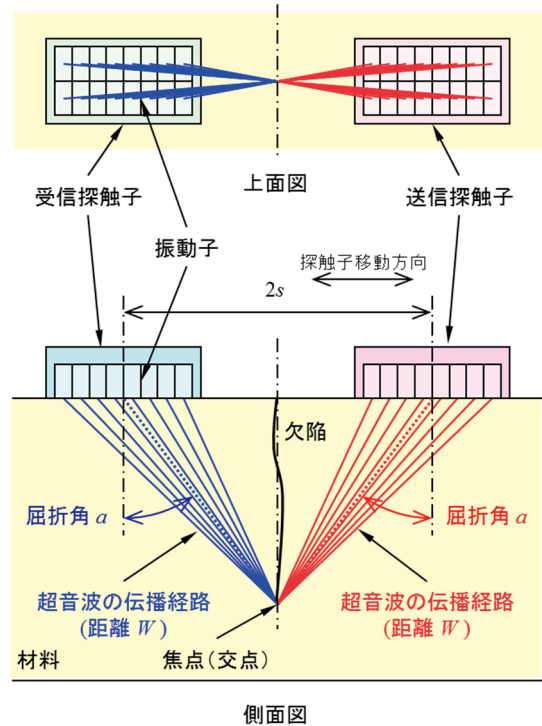


図 2 フェーズドアレイ TOFD 法

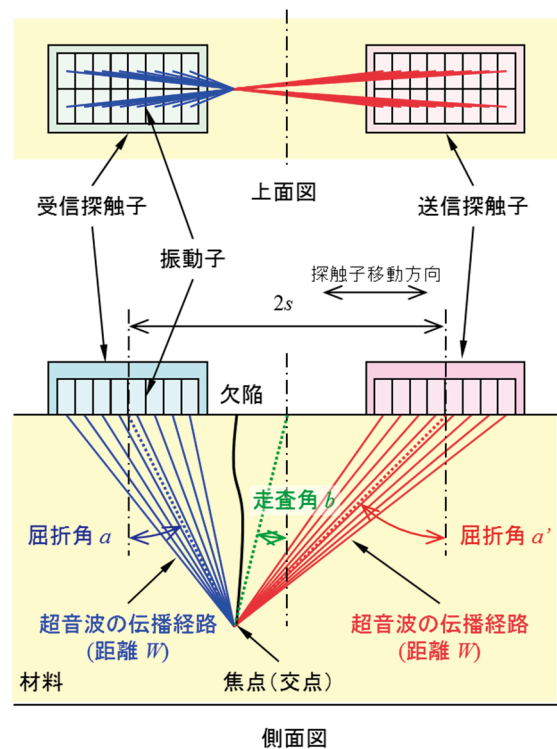


図 3 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

ことが可能となり、複数の異なる屈折角条件による探傷データが得られ、より確からしい探傷結果の判断が期待できる。

非対称 TOFD 法においては、送信と受信が対象となる条件を除き、送信と受信の屈折角は異なることから、送信

と受信の探触子の中心から焦点位置を結ぶ線と表面に垂直な線がなす角度を走査角と呼び、探傷条件として示すことにした。

2.2 解析対象

欠陥の開口面側から欠陥の深さを測定・評価する方法として著者が開発した非対称 TOFD 法について、本手法の特徴である異なる屈折角条件の適した範囲を明らかにするために、欠陥の開口面に探触子を配置する探傷を解析の対象とした。

3. 解析内容と解析モデル

3.1 解析内容

表 1 に、解析内容と測定条件を示す。非対称 TOFD 法について、4×8 および 2×16 の 2 種類の振動子配列の探触子を用いて、走査角（屈折角）による超音波ビームと欠陥端部エコーの変化を以下の通り検討した。

表 1 解析内容と測定条件

| | 屈折角 (度) | 焦点深さ (mm) |
|-----------|---------------|-----------|
| 超音波ビームの検討 | 0 10 20 | 20 |
| 端部エコーの検討 | 0 10 20 | 20 |

(1) 超音波ビームの検討

送信探触子から送信された超音波は、そのエネルギーが集まり超音波ビームと呼ばれる領域を構成する。送信探触子からの超音波の伝搬解析を行い、超音波強度の材料中の分布を求めることによって、超音波ビーム形状を検討した。送信振動子からの超音波ビームの 3 次元的な形状を検討するために、解析は 3 次元で行った。

(2) 欠陥端部エコーの検討

探触子を移動走査して探傷することを想定し、欠陥位置に対して異なる位置に探触子を配置して超音波伝搬解析を行い、それぞれの位置での欠陥先端からの散乱波の受信信号を求めた。得られた受信信号から、材料断面の探傷

画像に相当する B スコープ画像を作成した。探触子移動走査距離を 40mm とし、これを 2mm ピッチの探触子位置で解析を行った。

超音波伝搬解析には、有限要素解析による伊藤忠テクノソリューション製超音波伝搬解析ソフト ComWAVE を使用した。

3.2 解析モデル

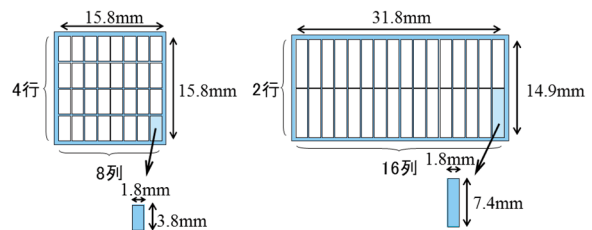
(1) 探触子

振動子配列の異なる 4×8 および 2×16 フェーズドアレイ探触子（以下、4×8 探触子、2×16 探触子）を用いた。表 2 にフェーズドアレイ探触子の仕様を、図 4 に振動子配列を示す。

図 5 に、これらのフェーズドアレイ探触子による測定の際に使用するウェッジを示す。図中には、探触子の振動子配置とその中心からの超音波の伝搬経路を赤色と青色の破線で示している。

表 2 探触子の仕様

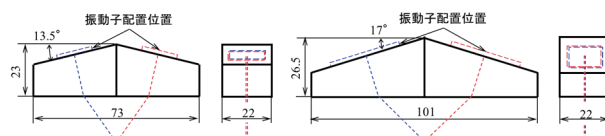
| 型式名称 | 4×8探触子 | 2×16探触子 |
|----------------------|-----------|-----------|
| 周波数 | 2MHz | 2MHz |
| 振動子数 | 32 | 32 |
| 振動子配列 (左右×前後) | 4×8 | 2×16 |
| 振動子配列ピッチ (左右×前後, mm) | 4.0×2.0 | 7.5×2.0 |
| 振動子全体寸法 (左右×前後, mm) | 15.8×15.8 | 14.9×31.8 |



(1) 4×8 探触子

(2) 2×16 探触子

図 4 フェーズドアレイ探触子の振動子配列



(1) 4×8 探触子

(2) 2×16 探触子

図 5 ウェッジ形状

(2) 材料・欠陥

被検体は、平面状の探傷面を持つ平板を想定した。

超音波ビームの検討では、探触子とともに 3 次元モデルとした。

端部エコーの検討では、送信と受信の探触子を結ぶ方向と直交する方向に欠陥面を持ち、深さ 20mm，間隙 0.5mm のスリット状の欠陥を配置した 2 次元モデルとした。

表 3 に、材料物性値を示す。ComWAVE では、弾性体の物性値は、均質等方材については、音速（伝搬速度）により設定する。

材料内部の超音波伝搬現象の可視化の妨げになるような超音波の不必要な反射を避けるために、材料の前後方向の端面には超音波の減衰領域を設定した。

表 3 材料物性値

| 材料 | 種別 | 縦波音速 (m/s) | 横波音速 (mm/s) | 密度 (kg/m ³) | 減衰 |
|-----|-------|--------------------|--------------------|-------------------------|----|
| 探触子 | 均質等方材 | 2.33×10^3 | 1.16×10^3 | 1.05×10^3 | なし |
| 試験体 | 均質等方材 | 5.74×10^3 | 3.23×10^3 | 7.90×10^3 | なし |

(3) 入力信号

入力信号として、解析モデルの送信探触子の振動子位置に、振幅 A が式(1)で表されるウェーブレット波による変位を初期条件として入力し、送信探触子の振動子からの発信波とした。図 6 に入力信号の波形を示す。

$$A = \cos(2\pi f t)(1 - \cos(2\pi f t / 3)) \quad \text{式 (1)}$$

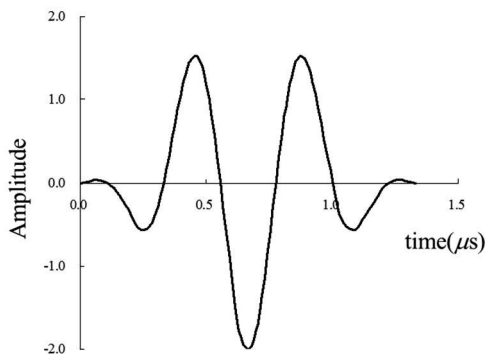
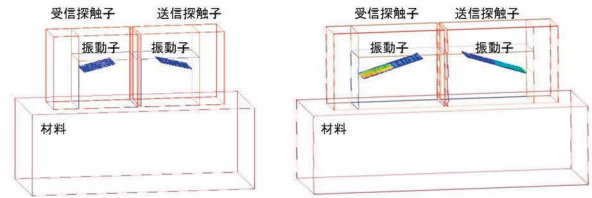


図 6 入力信号の波形

(4) 解析モデル

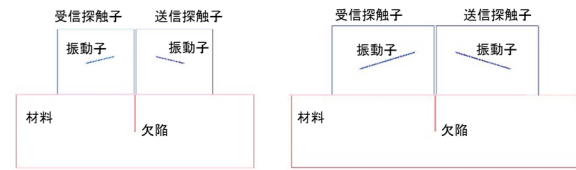
図 7 に、超音波ビームの検討に使用した 3 次元解析モデルを、図 8 に欠陥端部エコーの検討に使用した 2 次元解析モデルを示す。

超音波ビームの検討に使用した 3 次元解析モデルでは、超音波ビーム形状を可視化するために、探触子内部の超音波の反射を低減する探触子領域の各面に超音波を吸収・減衰させる無反射領域を設定している。



(1) 4×8 探触子 (2) 2×16 探触子

図 7 超音波ビームの検討用解析モデル



(1) 4×8 探触子 (2) 2×16 探触子

図 8 欠陥端部エコーの検討用解析モデル

(5) 解析条件

ComWAVE は、8 節点立方体を要素とする。要素寸法は超音波ビームの検討の際の 3 次元モデルでは 0.2mm，欠陥端部エコーの検討の際の 2 次元モデルでは 0.08mm とした。これは、解析対象である縦波 2MHz について、モデル中遅い音速をもつウェッジ材料の波長の約 5 分の 1 および約 13 分の 1 に、早い音速を持つ試験体材料の波長の約 13 分の 1 および約 32 分の 1 にそれぞれ相当する。

要素数は、3 次元モデルでは、約 34 百万要素 (4×8 探触子)，約 46 百万要素 (2×16 探触子)，2 次元モデルでは、約 1.3 百万要素 (4×8 探触子)，約 1.7 百万要素 (2×16 探触子) である。

時間ステップは、要素寸法と超音波伝搬速度から設定し、3 次元モデルでは 2.8×10^{-8} sec，2 次元モデルでは 1.11×10^{-8} sec である。

超音波の送信探触子の振動子の発信を開始時刻とする解析時間は、超音波ビームの検討の場合には、材料底面まで到達するまでの約 2.0×10^{-5} sec，欠陥端部エコーの検討の場合には、受信探触子の振動子の受信までとして、約 4.0×10^{-5} sec とした。

解析は、Intel Xeon 2.8GHz CPU を使用した 4 並列計算により行った。計算時間は、超音波ビームの検討の 3 次元モデル解析で約 1 時間であった。

欠陥端部エコーの検討では、B スコープ画像を得るために、この伝搬解析を走査移動する探触子位置毎に行うことから、探触子位置の数に応じた解析回数を要した。探触子走査範囲 40mm を 2mm ピッチの探触子位置で解析を行う解析数 21 回の場合で、約 1~1.7 時間の計算時間となった。

4. 解析結果

4.1 超音波ビームの検討

送信探触子から送信される超音波強度の分布を表す超音波ビームを、図 9 に示すように、超音波ビームの中心と推定される軸を含む超音波の入射方向の断面(前後方向)、

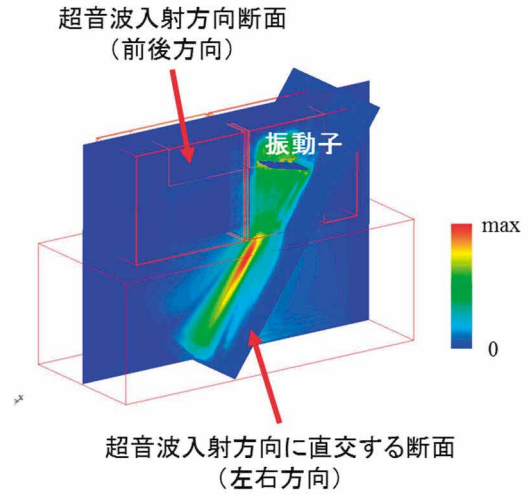


図 9 超音波ビーム可視化断面

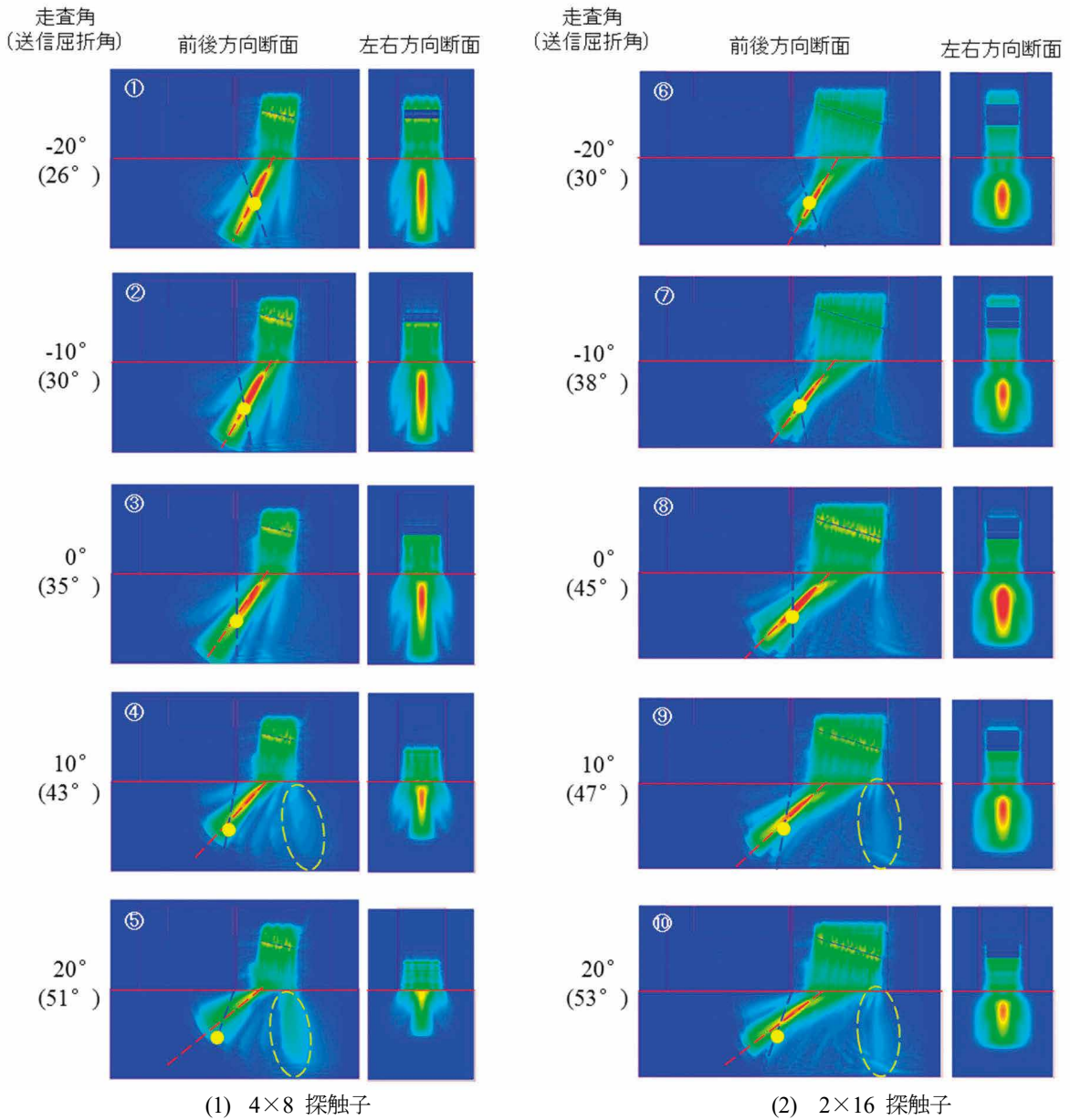


図 10 超音波ビーム走査角による変化

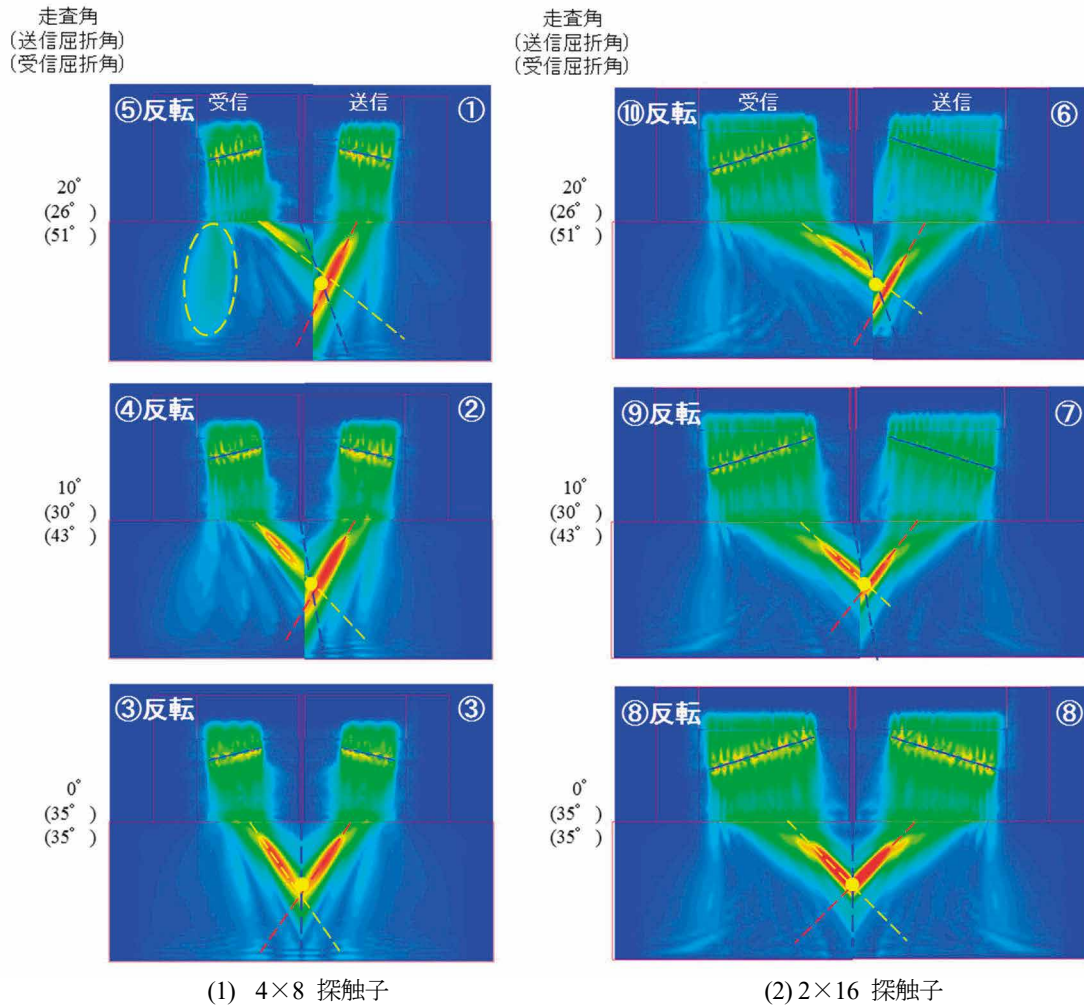


図 11 送受信の超音波ビーム

およびこれに直交する断面(左右方向)における超音波の強度分布を、青色から赤色までの色調変化により可視化した。

図 10 に、送信探触子から送信される超音波強度の分布を表す超音波ビームの走査角による変化を示す。入射方向の断面(前後方向)の強度分布において、強度分布から推定される超音波ビームの中心軸を赤色の破線で示している。この赤い破線の角度は送信探触子の屈折角に相当し、走査角に併記した。また、設定した走査角に相当する角度を青色の破線で、表面からの深さ 20mm の焦点を走査角の線上に黄色の丸い円で示している。

いずれの探触子でも、超音波ビームは焦点位置を含む方向に構成されている。しかし、走査角(屈折角)が大きくなると、超音波ビーム上の強度の大きい領域の焦点からのずれは大きくなり、4×8 探触子の方が顕著である。前後方向の振動子数は、超音波ビームの走査角(屈折角)の設定に影響し、この方向の振動子数の多い 2×16 探触子の方が超音波ビームの構成には有効であると言える。

走査角-20度の超音波ビーム(図 10 中①, ⑥)は、走査角 20 度の超音波ビーム(図 10 中⑤, ⑩)を左右反転させたもので受信される。図 11 に、送信と受信の超音波ビームを一つの図で示した。送信の超音波ビームと受信の超音波ビームの焦点上に欠陥端部があれば、そこからの散乱波が受信探触子の振動子で受信され、受信側の超音波ビーム構成に相当する遅延時間が与えられて受信信号が得られる。送信と受信の超音波ビームの焦点が一致していることが、強度の大きい受信信号を得るために必要である。表面からの深さ 20mm の焦点を走査角の線上に黄色の丸い円で示している。送受信の超音波ビームの交点は、走査角線上の焦点位置におおむね一致している。しかし、図 10 で示したように、超音波ビーム上の強度の大きい領域は、4×8 探触子、屈折角の大きい側で、焦点位置からのずれが大きくなっている。

図 10 において、黄色の破線円で示した主ビームとは異なる方向に、グレーチングローブのような強度分布が表

れている。走査角が大きくなることによって振動子の見かけのピッチが大きくなり発生したものと考えられる。

4.2 欠陥端部エコーの検討

図 12 に、B スコープ作成の基になった異なる探触子位置における超音波伝搬解析のうち、入射した超音波が欠陥端部に当たって散乱する状況を示す。送信振動子から送信された超音波は (①)、材料に入射した後、集束して欠陥の端部に到達し (②)、端部に当たって散乱した超音波の一部は受信探触子に向かい (③)、受信探触子の振動子に到達し (④)、受信信号が得られる。

異なる探触子位置の受信信号により、図 13 のような B スコープ画像が得られた。異なる探触子位置で得られた受信波形の信号強度を、青色から赤色までの色調によって走査角線上に描画したものである。B スコープに示された走査角を示す直線に相当する位置の受信波形を例として示

している。赤色の矢印で示した位置に欠陥端部における散乱波が表れており、走査角によるその強度の変化は顕著ではない。図 10 に示したような超音波ビーム上の強度の大きい領域と焦点位置のずれの影響は、B スコープ上の散乱波の識別に影響はなかった。B スコープ上の散乱波の振幅は、2×16 探触子の方が大きく観察され、振動子全体の探触子サイズの大きいことが効いている。

5. 設定条件の検討

超音波ビームの検討から、走査角が大きくなると、超音波ビームの強度の大きい領域の焦点からのずれが大きくなること、走査角を設定する方向の振動子数の多い方が、超音波ビームの強度の大きい領域の焦点からのずれが小さいことがわかった。欠陥端部エコーの検討から、この超音波ビームの強度の大きい領域と焦点のずれによる影響

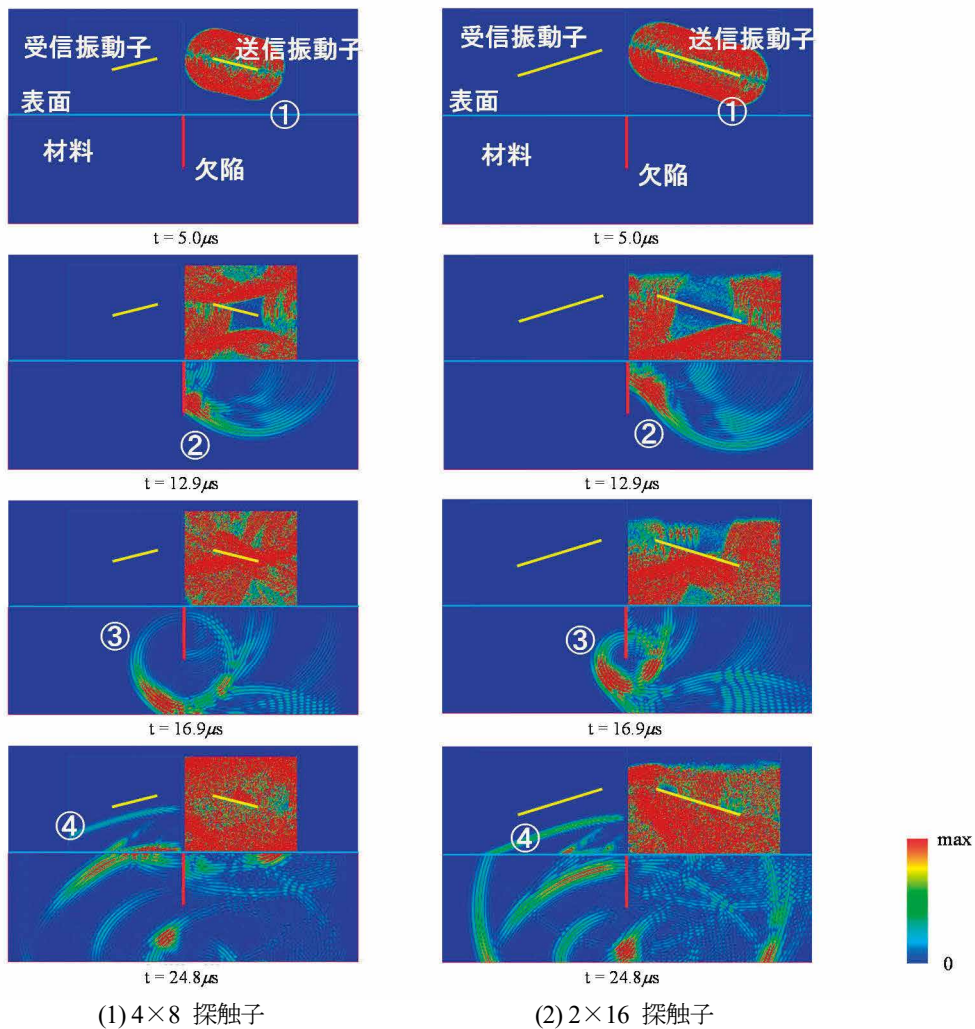


図 12 超音波伝搬状況

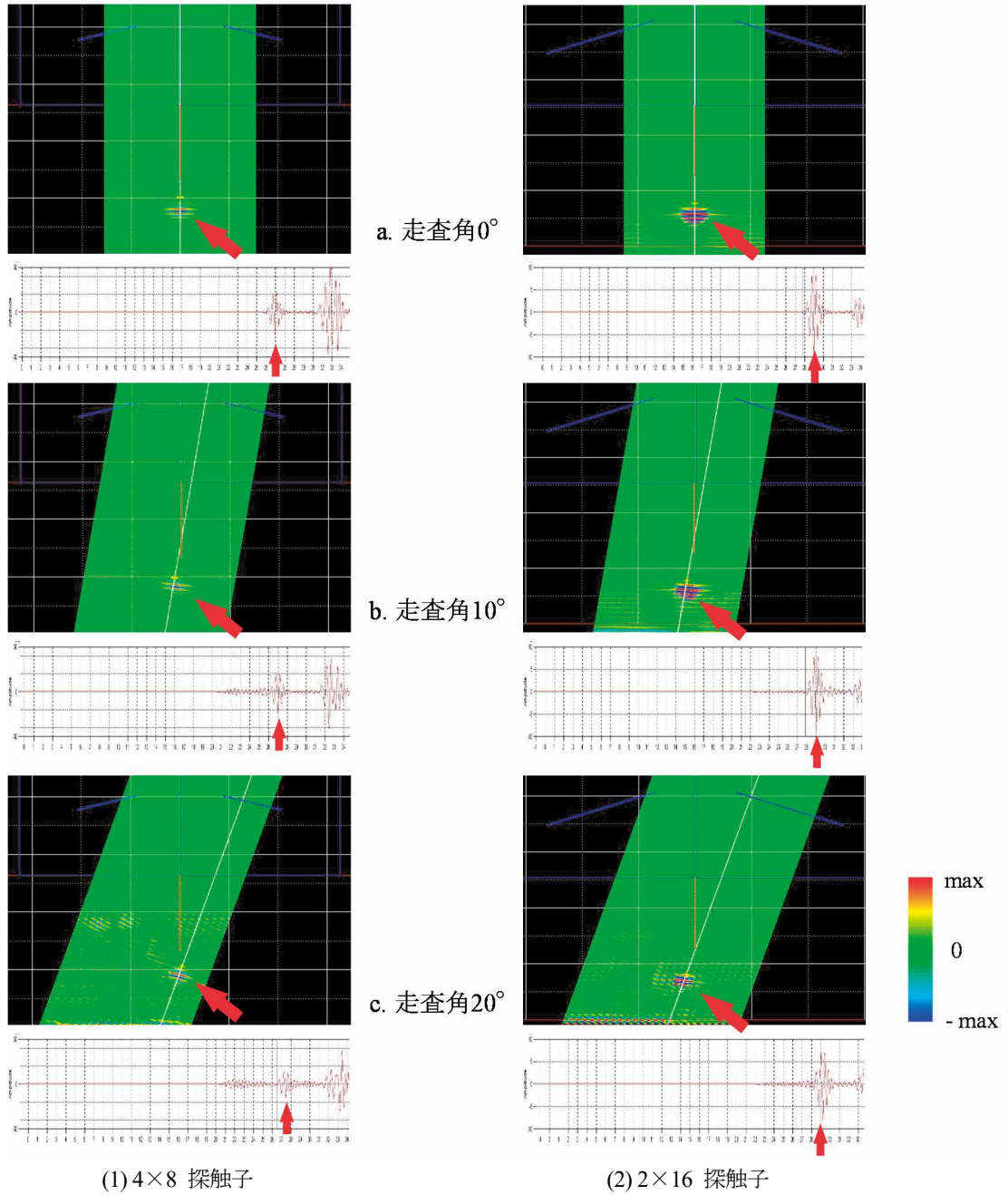


図 13 超音波伝搬状況

は顕著ではなかった。しかし、振動子数が大きいと、振幅の大きい散乱波の受信が期待できることがわかった。

均質等方材での解析に対して、実際の材料は非均質異方材であり、探傷部位も溶接部である。このことは、解析で明らかになった超音波ビームの強度が大きい領域と焦点位置のずれによって、欠陥端部の散乱波の受信、識別に影響することが考えられる。実際の材料を用いた測定試験による検証とその対策の検討が望まれる。

6. おわりに

容器管台異材継手部の超音波探傷試験の探傷手法として開発した、非対称 TOFD 法について、フェーズドアレイ探触子の振動子数、屈折角の適切な設定条件を明らかにするために、超音波伝搬シミュレーション解析によりこれを検討した

その結果以下の結果が得られた。

- ① いずれの探触子でも、超音波ビームは焦点位置を含む方向に構成された。

- ② 走査角が大きくなると、超音波ビーム上の強度の大きい領域の焦点からのずれは大きくなった。
 - ③ 送受信の超音波ビームの交点は、焦点位置におおむね一致していた。
 - ④ B スコープでは、散乱波の強度の走査角による変化は顕著ではなかった。
 - ⑤ 走査角を設定する前後方向の振動子数が多い方が、より振幅の大きい散乱波の受信が期待できる。
 - ⑥ 超音波ビーム上の強度が大きい領域と焦点のずれは、溶接金属などの実際の材料においては、欠陥端部の散乱波の受信、識別に大きく影響することが考えられ、実際の材料を用いた測定試験による検討とその対策の検討が望まれる
- (7) OLYMPUS NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Olympus NDT Guideline, p.120, (2006).

参考文献

- (1) 関西電力, ”大飯発電所3号機の定期検査状況について(原子炉容器Aループ出口管台溶接部の傷の原因と対策),”
<http://www1.kepco.co.jp/pressre/2008/0926-3j.html>
- (2) (社)日本非破壊検査協会, 日本非破壊検査協会規格 NDIS 2423-2001 TOFD 法によるきず高さ測定方法, (2001).
- (3) 石田仁志, 北阪純一, 遠藤賢, ”フェーズドアレイ非対称ビーム TOFD 超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の測定,” INSS Journal, Vol.19, p.195, (2012).
- (4) 石田仁志, 遠藤賢, 北阪純一, ”フェーズドアレイ非対称ビーム TOFD 超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の測定(第2報) — 曲率のある欠陥開口面および非開口面測定への適用 —,” INSS Journal, Vol.20, p.171, (2013).
- (5) 石田仁志, 北阪純一, 遠藤賢, “Ni 基合金溶接部 SCC のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法とマルチアングル合成法による深さサイジング, その1”, 日本非破壊検査協会平成24年度秋季講演大会予稿集, (2012).
- (6) 石田仁志, 北阪純一, 遠藤賢, “Ni 基合金溶接部 SCC のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法とマルチアングル合成法による深さサイジング, その2”, 日本非破壊検査協会平成24年度秋季講演大会予稿集, (2012).